

Sobre el origen de la gravedad Y las Leyes de Newton

Erik Verlinde
Instituto de Física Teórica
Universidad de Amsterdam
Valckenierstraat 65
1018 XE, Amsterdam
Los Países Bajos

Abstracto

Partiendo de los primeros principios y de los supuestos generales, la ley de gravitación de Newton se manifiesta que surge natural e inevitablemente en una teoría en la que el espacio es emergente a través de un escenario holográfico. La gravedad se explica como una entropía de la información asociada a las posiciones de los cuerpos materiales. Una generalización relativista de los argumentos presentados directamente conduce a las ecuaciones de Einstein. Cuando el espacio es emergente incluso la ley de Newton de la inercia necesita ser explicada. El principio de equivalencia nos lleva a concluir que es en realidad esta ley de inercia cuyo origen es entrópico

Introducción

De todas las fuerzas de la naturaleza la gravedad es claramente la más universal. La gravedad influye y está influenciado por todo lo que lleva una energía, y está íntimamente conectado con La estructura del espacio-tiempo. La naturaleza universal de la gravedad también se demuestra El hecho de que sus ecuaciones básicas se parecen mucho a las leyes de la termodinámica e Hidrodinámica. Hasta ahora, no ha habido una explicación clara de esta semejanza.

La gravedad domina a grandes distancias, pero es muy débil a pequeñas escalas. De hecho, las leyes básicas sólo han sido probadas hasta distancias del orden de un milímetro. La gravedad es también considerablemente más difícil de combinar con la mecánica cuántica que todas las otras fuerzas. La búsqueda de la unificación de la gravedad con estas otras fuerzas de la naturaleza, a un nivel microscópico, por lo tanto, no puede ser el enfoque correcto. Se sabe que conduce a muchos problemas, Paradojas y puzzles. La teoría de las cuerdas ha resuelto en cierta medida algunas de ellas, pero no todo. Y todavía tenemos que averiguar qué nos enseña la teoría de la cadena.

Muchos físicos creen que la gravedad, y la geometría espacio-tiempo son emergentes. También la Teoría de cuerdas y sus desarrollos relacionados han dado varias indicaciones en esta dirección. Las claves particularmente importantes provienen del AdS / CFT, o más generalmente, corresponde a una cuerda abierta / cerrada. Esta correspondencia conduce a una dualidad entre Teorías que contienen la gravedad y las que no. Por lo tanto, proporciona pruebas para el hecho de que la gravedad pueda emerger de una descripción microscópica que no sabe sobre su existencia.

La universalidad de la gravedad sugiere que su surgimiento debe entenderse desde los principios generales que son independientes de los detalles específicos de la teoría microscópica fundamental. En este artículo argumentaremos que la noción central necesaria para derivar la gravedad es la información. Más precisamente, es la cantidad de información asociada con materia y su localización, sea cual sea la forma que la teoría microscópica quiera tener, medido en términos de entropía. Los cambios en esta entropía cuando la materia se desplaza a una fuerza entrópica que, como demostraremos, toma la forma de gravedad. Su origen por lo tanto radica en la tendencia de la teoría microscópica a maximizar su entropía.

La suposición más importante será que la información asociada con un parte del espacio obedece el principio holográfico. La evidencia de apoyo más sólida para el principio holográfico proviene de la física del agujero negro y la correspondencia AdS / CFT. Estos desarrollos teóricos indican que al menos parte de los grados microscópicos de libertad pueden representarse holográficamente, ya sea en la frontera del espacio-tiempo o en horizontes.

Sin embargo, el concepto de holografía parece ser mucho más general. Por ejemplo, En la correspondencia AdS / CFT se puede mover el límite hacia adentro explotando una versión holográfica del grupo de renormalización. De manera similar, en la física de los agujeros negros existen ideas que la información puede ser almacenada en horizontes estirados. Además, al pensar en los observadores acelerados, en principio se pueden ubicar pantallas holográficas

en cualquier lugar del espacio. En todos estos casos la aparición de la dirección holográfica es Acompañado de redshifts, y relacionado con algún procedimiento de grano grueso. Si todos estos Las ideas combinadas son correctas debe existir un marco general que describa cómo El espacio emerge junto con la gravedad. Por lo general, la holografía se estudia en contextos relativistas. Sin embargo, la gravedad La fuerza también está presente en nuestro mundo diario no-relativista. El origen de la gravedad, sea cual sea Es, por tanto, también debe explicar naturalmente por qué esta fuerza aparece de la manera que lo hace, Y obedece la ley de Newton de la gravitación. De hecho, cuando el espacio es emergente, también el otro Las leyes de Newton tienen que ser re-derivadas, porque los conceptos estándar como la posición, la velocidad, La aceleración, la masa y la fuerza están lejos de ser obvias. Por lo tanto, en tal contexto las leyes de La mecánica tiene que aparecer junto con el propio espacio. Incluso un concepto básico como la inercia No se da, y necesita ser explicado otra vez. En este trabajo presentamos un escenario holográfico para la aparición del espacio y Los orígenes de la gravedad y la inercia, que están conectados por la equivalencia principio. Partiendo de los primeros principios, utilizando únicamente conceptos independientes del espacio como Energía, entropía y temperatura, se demuestra que las leyes de Newton aparecen naturalmente y Prácticamente inevitablemente. La gravedad se explica como una fuerza entrópica causada por un cambio En la cantidad de información asociada con las posiciones de cuerpos de materia. Un ingrediente crucial es que sólo un número finito de grados de libertad están asociados Con un volumen espacial dado, según lo dictado por el principio holográfico. La energía, que Es equivalente a la materia, se distribuye uniformemente sobre los grados de libertad, y por lo tanto Conduce a una temperatura. El producto de la temperatura y el cambio de entropía Se demuestra que el desplazamiento de la materia es igual al trabajo realizado por la fuerza gravitacional fuerza. De esta manera, la ley de la gravedad de Newton emerge de manera sorprendentemente simple. El principio holográfico no ha sido fácil de extraer de las leyes de Newton Y Einstein, y está profundamente escondido dentro de ellos. Por el contrario, a partir de la holografía, Nos encontramos con que estas leyes bien conocidas salen directamente e inevitablemente. Invirtiendo La lógica que lleva a las personas de las leyes de la gravedad a la holografía, obtendremos una Mucho más nítida e incluso más simple de lo que es la gravedad. Por ejemplo, aclara por qué La gravedad permite una acción a una distancia incluso cuando no hay campo de fuerza mediadora. Las ideas presentadas son consistentes con nuestro conocimiento de la teoría de cuerdas, pero si son correctas Deben tener importantes implicaciones para

esta teoría también. En particular, la descripción de la gravedad como consecuencia del intercambio de cadenas cerradas ya no puede ser válida. De hecho, parece que las cuerdas tienen que ser emergentes también. Comenzamos en la sección 2 con una exposición del concepto de fuerza entrópica. La figura 3 ilustra el argumento heurístico principal en un entorno no relativista simple. Su generalización a la distribución arbitraria de la materia se explica en la sección 4. En la sección 5, extendemos estos resultados al caso relativista, y derivamos las ecuaciones de Einstein. Las conclusiones se presentan en la sección 7. 3

Página 4

2 Fuerza entrópica. Una fuerza entrópica es una fuerza macroscópica efectiva que se origina en un sistema con muchos grados de libertad por la tendencia estadística a aumentar su entropía. La fuerza se expresa en términos de diferencias de entropía, y es independiente de los detalles de la dinámica microscópica. En particular, no hay un campo fundamental asociado con una fuerza entrópica. Las fuerzas entrópicas ocurren típicamente en sistemas macroscópicos tales como en coloides o biofísica. Grandes moléculas coloidales suspendidas en un ambiente térmico de partículas más pequeñas, por ejemplo, experimentan fuerzas entrópicas debido al volumen excluido. La osmosis es otro fenómeno impulsado por una fuerza entrópica. Quizás el ejemplo más conocido es la elasticidad de una molécula de polímero. Un solo polímero puede ser modelado uniendo juntos muchos monómeros de longitud fija, donde cada monómero puede girar libremente alrededor de los puntos de unión y dirigirse en cualquier dirección espacial. Cada una de estas configuraciones tiene la misma energía. Cuando la molécula de polímero se sumerge en un baño de calor, le gusta ponerse en una forma aleatoria. En espiral ya que éstas son entropicamente favorecidas. Hay muchos más configuraciones cuando la molécula es corta comparada con cuando es estirada en una configuración extendida. La tendencia estadística a regresar a un estado de entropía máxima se traduce en una fuerza macroscópica, en este caso la fuerza elástica. Mediante el uso de pinzas uno puede tirar de los extremos del polímero aparte, y traerlo fuera de su configuración de equilibrio por una fuerza externa F , como se muestra en la figura 1. Para definiteness, mantenemos un extremo fijo, digamos en el origen, y movemos el otro extremo A a lo largo del eje x . La entropía es igual a $S(E, x) = k_B \Omega(E, x)$ (2.1) donde k_B es constante y $\Omega(E, x)$ denota el volumen de la configuración espacio para todo el sistema en función de la energía total E del baño de calor y la posición x del segundo punto final. La dependencia x es enteramente configuracional. Efecto: no hay contribución microscópica a la energía E que depende de x . $F \propto T$ Figura 1: Un polímero articulado libre se sumerge en un baño de calor con la temperatura T y se tira fuera de su estado de equilibrio por una fuerza externa F . La fuerza entrópica apunta en sentido contrario. 4

Página 5

En el conjunto canónico la fuerza F se introduce en la función de partición $Z(T, F) = \int dE dx \Omega(E, x) e^{-(E + Fx) / k_B T}$. (2.2) Como variable externa dual a la longitud x del polímero. La fuerza F requerida para Mantener el polímero a una longitud fija x para una temperatura dada E se puede deducir de Las ecuaciones de punto de silla $1/T = S_S \partial E$, $F/T = S_S \partial x$. (2.3) Por el equilibrio de fuerzas, la fuerza externa F debe ser igual a la fuerza entrópica, que Intenta restaurar el polímero a su posición de equilibrio. Se reconoce una fuerza entrópica Por los hechos que señala en la dirección de la entropía creciente, y, en segundo lugar, que Es proporcional a la temperatura. Para el polímero se puede demostrar que la fuerza obedece ley de Hooke $F \sim \text{polímero} \cdot \text{const} \cdot k_B T \langle x \rangle$. Este ejemplo deja claro que a un nivel macroscópico una fuerza entrópica puede ser conser- Por lo menos cuando la temperatura se mantiene constante. El potencial correspondiente No tiene ningún significado microscópico, sin embargo, y es emergente. Es interesante estudiar el equilibrio de energía y entropía cuando uno El polímero vuelve a su posición de equilibrio, mientras permite que la fuerza realice el trabajo En un sistema externo. Por conservación de energía, este trabajo debe ser igual a la energía Que se ha extraído del baño de calor. La entropía del baño de calor reducido. Para un baño de calor infinito esto sería en la misma cantidad que el aumento en Entropía del polímero. Por lo tanto, en esta situación la entropía total permanecerá constante. Esto se puede estudiar con más detalle en el conjunto micro-canónico, ya que Toma en cuenta la energía total incluida la del baño de calor. Para determinar el Fuerza entrópica, se introduce de nuevo una fuerza externa F y se examina el efectivo. Específicamente, se considera el conjunto micro canónico dado por $\Omega(E + Fx, x)$, E impone que la entropía es extremal. Esto da $dx S(E + Fx, x) = 0$ (2.4) Se verifica fácilmente que esto conduce a las mismas ecuaciones (2.3). Sin embargo, ilustra Que microcanónicamente la temperatura está en posición general dependiente, y la fuerza También depende de la energía. El término Fx puede ser visto como la energía que se puso en Sacando el polímero de su posición de equilibrio. Esta ecuación dice Por lo tanto, que la energía total se reduce cuando el polímero se deja Volver a su posición de equilibrio, pero que la entropía en primera aproximación se mantiene lo mismo. Nuestro objetivo en las siguientes secciones es argumentar que la gravedad es también un entropismo Fuerza, y que el mismo tipo de razonamientos se aplican a él con sólo ligeras modificaciones. 3 Nos gusta dar las gracias a B. y M. Nienhuis Shigemori para Enlightning debates sobre la siguiente parte. 5

Página 6

3 Emergencia de las Leyes de Newton El espacio es en primer lugar un dispositivo introducido para describir las posiciones y movimientos De partículas. El espacio es literalmente un espacio de almacenamiento para la información. Esta La información se asocia naturalmente con la materia. Dado que el máximo permitido La formación es finita para cada parte del espacio, es imposible localizar una partícula con Precisión infinita en un punto de un espacio continuo. De hecho, los puntos y coordenadas Surgen como conceptos derivados. Se podría suponer que la información se almacena en puntos

Espacio discretizado (como en un modelo de celosía). Pero si toda la información asociada Sin duplicación, no se obtendría una descripción holográfica. De hecho, una No recuperaría la gravedad. Por lo tanto, vamos a suponer que la información se almacena en superficies, o pantallas. Las pantallas separan puntos, y de esta manera son el lugar natural para almacenar información Sobre partículas que se mueven de un lado al otro. Así, imaginamos que este La información sobre las partículas de ubicación se almacena en bits discretos en las pantallas. los Dinámica en cada pantalla está dada por algunas reglas desconocidas, que se pueden Como una forma de procesar la información que se almacena en ella. Por lo tanto, no tiene A ser dada por una teoría de campo local, o cualquier cosa familiar. Los detalles microscópicos son Irrelevante para nosotros. Supongamos también que, como en AdS / CFT, hay una dirección especial A escala o una variable de granulación gruesa de la teoría microscópica. Esta es la dirección En la que el espacio es emergente. Así que las pantallas que almacenan la información son como Horizontes En un lado hay espacio, en el otro lado nada todavía. Asumiremos Que la teoría microscópica tiene una noción bien definida del tiempo, y su dinámica es el tiempo Traducción invariante. Esto permite definir la energía, y empleando técnicas De la física estadística, temperatura. Estos serán los ingredientes básicos junto con La entropía asociada con la cantidad de información. 3.1 Fuerza e inercia. Nuestra suposición inicial está directamente motivada por la experiencia original de pensamiento de Bekenstein. De la cual obtuvo una famosa fórmula de entropía. Consideró una partícula con Masa m atada a una "cuerda" ficticia que se baja hacia un agujero negro. Sólo Antes del horizonte se deja caer la partícula. Debido al desplazamiento al rojo infinito de la masa El aumento del agujero negro puede hacerse arbitrariamente pequeño, clásico. Si uno tomara un Gas térmico de las partículas, este hecho conduciría a problemas con la segunda ley del Modinámica. Bekenstein resolvió esto argumentando que cuando una partícula es una Compton Longitud de onda desde el horizonte, se considera que es parte del agujero negro. Por lo tanto, Aumenta la masa y el área del horizonte por una pequeña cantidad, que identificó con una Un poco de información. Esto le llevó a su ley de área para la entropía del agujero negro. Queremos imitar este razonamiento no cerca de un horizonte de agujero negro, sino en plano no-

Página 7

metro $A \times A$ S T Figura 2: Una partícula con masa se aproxima a una parte de la pantalla holográfica. La pantalla Limita la parte emergida del espacio, que contiene la partícula, y almacena los datos que describen La parte del espacio que aún no ha surgido, así como alguna parte del espacio emergido. Espacio relativista. Así que consideramos una pequeña pieza de una pantalla holográfica, y una partícula De masa m que se aproxima desde el lado en el que el espacio tiempo ya ha surgido. Finalmente, la partícula se fusiona con los grados de libertad microscópicos en la pantalla, Pero antes de hacerlo, ya influye en la cantidad de información que se almacena en la pantalla. La situación se ilustra en la figura 2. Motivados por el argumento de Bekenstein, postulamos que el cambio de entropía Asociada con la información sobre el

límite es igual a $\Delta S = B 2\pi k$ cuando $\Delta x = m$. (3.5) La razón para poner en el factor de 2π , se hará evidente pronto. Reescribamos Esta fórmula en la forma un poco más general asumiendo que el cambio en la entropía Cerca de la pantalla es lineal en el desplazamiento Δx . $\Delta S = B 2\pi k m$. (3.6) Para comprender por qué es también proporcional a la masa m , imaginemos Partícula en dos o más sub-partículas más ligeras. Cada sub-partícula lleva entonces su propia Asociado en la entropía después de un cambio Δx . Dado que la entropía y la masa son aditivas, Por lo tanto, es natural que el cambio de entropía sea proporcional a la masa. Cómo Surgir la fuerza La idea básica es utilizar la analogía con la ósmosis a través de un semi-membrana. Cuando una partícula tiene una razón entropía para estar en un lado de la membrana Y la membrana lleva una temperatura, experimentará una fuerza efectiva igual a $F\Delta x = T\Delta S$. (3.7) Esta es la fuerza entrópica. Así, para tener una fuerza no cero, necesitamos tener Una temperatura que no desaparece. De la ley de Newton sabemos que una fuerza conduce a una

Página 8

Aceleración no cero. Por supuesto, es bien sabido que la aceleración y la temperatura Están estrechamente relacionados. A saber, como Unruh demostró, un observador en un marco acelerado Experimenta una temperatura $k_B T = \frac{\hbar a}{2\pi c}$, (3.8) Donde a denota la aceleración. Tomemos esto como la temperatura asociada con Los bits en la pantalla. Ahora está claro por qué la ecuación (3. 6) para ΔS fue elegido para ser De la forma dada, incluyendo el factor de 2π . Se selecciona precisamente de tal manera que Uno recupera la segunda ley de Newton $F = ma$. (3.9) como se verifica fácilmente mediante la combinación de (3.8) junto con (3.6) y (3.7). La ecuación (3.8) debe leerse como una fórmula para la temperatura T que se requiere Para causar una aceleración igual a . Y no como de costumbre, ya que la temperatura Una aceleración. 3.2 La ley de la gravedad de Newton. Supongamos ahora que nuestra frontera no se extiende infinitamente, sino que forma una superficie cerrada. Más Específicamente, supongamos que es una esfera. Para lo siguiente es mejor olvidarse de la ley Unruh (3 0.8) , ya que no lo necesita. Sólo sirvió como una motivación adicional para (3.6). La declaración clave es simplemente que necesitamos tener una temperatura para Tener una fuerza Puesto que queremos entender el origen de la fuerza, necesitamos saber De donde proviene la temperatura. Uno puede pensar en el límite como un dispositivo de almacenamiento de información. Asumiendo Que el principio holográfico sostiene, el espacio de almacenamiento máximo, o el número total de Bits, es proporcional al área A . De hecho, en una teoría del espacio emergente esto cómo Área puede definirse: cada bit fundamental ocupa por definición una celda unitaria. Señalemos el número de bits utilizados por N . Es natural suponer que este Número será proporcional al área. Así que escribimos $N = \frac{A}{\ell_P^2}$ (3,10) Donde introducimos una nueva constante G . Finalmente, esta constante va a ser iden- Naturalmente, con la constante de Newton. Pero como no hemos asumido nada Sin embargo, sobre la existencia de una fuerza gravitatoria, simplemente se puede considerar esta ecuación como La definición de G . Por lo tanto, la única hipótesis hecha aquí es que el

número de bits es Proporcional al área. Nada mas. Supongamos que existe una energía total E presente en el sistema. Hagamos ahora el Simple suposición de que la energía está dividida uniformemente sobre los bits N . La temperatura 8

Página 9

metro F METRO R T Figura 3: Una partícula de masa m cerca de una pantalla holográfica esférica. La energía es uniforme Distribuido sobre los bits ocupados, y es equivalente a la masa M que emergería en el Parte del espacio rodeada por la pantalla. Es entonces determinada por la regla de equipartición $E = \frac{1}{2} N k_B T$ (3.11) Como la energía media por bit. Después de esto solo necesitamos una ecuación más: $E = mc^2$. (3.12) Aquí M representa la masa que surgiría en la parte del espacio encerrada por la , Vea la figura 3. Aunque la masa no es directamente visible en el espacio emergido, Su presencia se nota a través de su energía. El resto es sencillo: uno elimina E e inserta la expresión para el número de bits para determinar T . A continuación se utiliza el postulado (3.0.6) para el cambio de Entropía para determinar la fuerza. Finalmente uno inserta $A = 4\pi R^2$. Y uno obtiene la ley familiar: $F = G Mm / R^2$. (3.13) ¡Hemos recuperado la ley de gravitación de Newton, prácticamente desde los primeros principios! Estas ecuaciones no sólo salen por accidente. Tuvo que trabajar, en parte por Dimensiones, y también porque las leyes de Newton han sido ingredientes en la Pasos que conducen a la termodinámica del agujero negro y el principio holográfico. En un sentido Hemos invertido estos argumentos. Pero la lógica es claramente diferente y Luz sobre el origen de la gravedad: es una fuerza entrópica! Esa es la declaración principal, que Es nuevo y no se ha hecho antes. Si es verdad, esto debería tener profundas consecuencias. 9

Página 10

3.3 Naturalidad y robustez de la derivación. Nuestro punto de partida era que el espacio tiene una dirección holográfica emergente. La adición Los ingredientes internacionales fueron que (i) hay un cambio de entropía en la dirección emergente (ii) el número de grados de libertad es proporcional al área de la pantalla, y (iii) la energía está distribuida uniformemente sobre estos grados de libertad. Después de eso es Inevitable que la fuerza resultante tome la forma de la ley de Newton. De hecho, esta Puede generalizarse a dimensiones arbitrarias 4 con la misma conclusión. Pero cómo Robustos y naturales son estos argumentos heurísticos? Tal vez la suposición menos obvia sea la equipartición, que en general sólo Para sistemas libres. Pero ¿qué tan esencial es? La energía se extiende por lo general Grados de libertad según alguna función de distribución no trivial. Cuando el perdido Bits son elegidos al azar entre todos los bits, uno espera que el cambio de energía asociado con ΔS sigue siendo proporcional a la energía por unidad de área E / A . Este hecho podría Ser verdaderos incluso cuando la equipartición no es estrictamente obedecida. ¿Por qué necesitamos la velocidad de la luz c en este contexto no relativista? Fue necesario Para convertir la masa M en una energía, que proporciona el baño de calor requerido para La fuerza entrópica. En el

ambiente no-relativista este baño de calor es infinito, pero en Principio uno tiene en cuenta que el baño de calor pierde o gana energía cuando la partícula cambia su ubicación bajo la influencia de una fuerza externa. Esto conducirá a los desplazamientos al rojo relativista, como veremos. Desde el postulado (3.5) es la premisa básica de la que todo lo demás sigue, vamos a discutir su significado con más detalle. ¿Por qué cambia exactamente la entropía cuando uno se desplaza por una longitud de onda Compton? De hecho, uno puede preguntarse por qué necesitamos introducir la constante de Planck en primer lugar, ya que el único objetivo era derivar las leyes clásicas de Newton. De hecho, finalmente cae de la mayoría de fórmulas importantes. Así, en principio uno podría multiplicarlo con cualquier constante y todavía obtener el mismo resultado. Por lo tanto, sólo sirve como una variable auxiliar que se necesita por razones dimensionales. Por lo tanto, se puede elegir a voluntad, y se define de manera que (3.5) es exactamente válido. El contenido principal de esta ecuación es, pues, simplemente que hay un cambio de entropía perpendicular a la pantalla proporcional a la masa m y al desplazamiento Δx . Eso es todo lo que hay que hacer. Si nos alejamos más de la pantalla, el cambio de entropía en general sigue la misma regla. Supongamos que la partícula permanece en el radio R mientras que la pantalla se mueve a $R_0 < R$. El número de bits en la pantalla se multiplica por un factor $(R/R_0)^2$, mientras que la temperatura se divide por el mismo factor. Efectivamente, esto significa que sólo h se multiplica por ese factor, y dado que se desvía, la fuerza resultante permanece igual. En esta situación, la información asociada con la partícula ya no es concentrada en un área pequeña, pero se extiende sobre la pantalla. La siguiente sección contiene una propuesta de cómo se distribuye, incluso para las configuraciones de materia general. 4 En d dimensiones (3.10) incluye un factor $1/2^{D-2}$ para obtener la identificación correcta con la constante de Newton. 10

Página 11

3.4 La inercia y el potencial de Newton. Para completar la derivación de las leyes de Newton debemos entender por qué el símbolo a , que, básicamente, se introdujo a mano en (3.0.8), es igual a la aceleración física x . De hecho, hasta ahora nuestra discusión era casi estática, por lo que no hemos determinado aún cómo conectar el espacio en diferentes momentos. De hecho, puede parecer algo contra-intuitivo que la temperatura T está relacionada con la cantidad vectorial a , mientras que en nuestras identificaciones el gradiente de entropía $\Delta S / \Delta x$ está relacionado con la magnitud escalar m . De cierta manera parece más natural tenerlo al revés. Así que vamos a reconsiderar lo que le sucede a la partícula con masa m cuando se acerca a la pantalla. Aquí debería fusionarse con los grados microscópicos de libertad en la pantalla, y por lo tanto se compone de los mismos bits que los que viven en la pantalla. Puesto que cada bit lleva una energía $1/2 k_B T$, el número de bits sigue n de $mc^2 = 1/2 n k_B T$. (3.14) Cuando insertamos esto en la ecuación (3.6), y el uso (3.8), podemos expresar la entropía cambio en términos de la aceleración $\Delta S_{\text{norte}} = K_B A \Delta x^2 c^2$ (3.15) Mediante la combinación de las ecuaciones anteriores, una vez por supuesto otra vez recupera $F = ma$ como entropía fuerza. Pero,

introduciendo el número de bits n asociados con la partícula, Logró hacer las identificaciones más naturales en términos de su escalar versus Carácter del vector. De hecho, hemos eliminado h de las ecuaciones, que en vista de Nuestro comentario anterior es una buena cosa. Por lo tanto, concluimos que la aceleración está relacionada con un gradiente de entropía. Esto será Uno de nuestros principales principios: la inercia es una consecuencia del hecho de que una partícula en reposo Permanecerá en reposo porque no hay gradientes de entropía. Dado este hecho, es natural Introducir el potencial de Newton Φ y escribir la aceleración como un gradiente $A = -\nabla\Phi$. Esto nos permite expresar el cambio de entropía de la manera concisa $\Delta S_{\text{norte}} = -k_B \Delta\Phi / 2c^2$ (3.16) Llegamos así a la importante conclusión de que el potencial de Newton Φ mantiene un seguimiento de El agotamiento de la entropía por bit. Por lo tanto, es natural identificarlo con un Graining variable, como la escala (grupo de renormalización) en AdS / CFT. De hecho, en el En la próxima sección se propone un escenario holográfico para la aparición del espacio en El potencial de Newton desempeña precisamente ese papel. Esto nos permite generalizar nuestra discusión A otras distribuciones de masas y posiciones arbitrarias en una forma natural y bastante hermosa Y dar apoyo adicional a los argumentos presentados. 11

Página 12

4 Gravedad Emergente para Distribuciones de Materia General. El espacio emerge a un nivel macroscópico sólo después de un grano grueso. Por lo tanto, habrá Una entropía finita asociada con cada configuración de materia. Esta entropía mide la Cantidad de información microscópica que es invisible al observador macroscópico. En General, esta cantidad dependerá de la distribución del asunto. La información es Siendo procesada por la dinámica microscópica, que parece aleatoria de un macroscópico punto de vista. Pero para determinar la fuerza no necesitamos los detalles de la información, Ni la dinámica exacta, sólo la cantidad de información dada por la entropía, y la Energía que está asociada con ella. Si la entropía cambia en función de la ubicación De la distribución de la materia, conducirá a una fuerza entrópica. Por lo tanto, el espacio no puede emerger solo. Tiene que ser dotado por un libro Mantenimiento de un dispositivo que mantiene un registro de la cantidad de información para un Tribución. Resulta que, en una situación no relativista, este dispositivo es proporcionado por El potencial de Newton Φ . Y la fuerza entrópica resultante se llama gravedad. Empezamos con la información microscópica. Se supone que se almacena en holográfico Pantallas Tenga en cuenta que la información tiene una propiedad de inclusión natural: al olvidar ciertos Bits, por grano grueso, se reduce la cantidad de información. Este grano grueso Puede lograrse mediante el establecimiento de promedios, la transformación de un bloque de hilados, la integración Algún otro procedimiento de grupo de renormalización. En cada paso se obtiene una Granulada de los datos microscópicos originales. El lado de la cuerda gravitacional o cerrado De estas dualidades es por muchos aún se cree que se definen de forma independiente. Pero en nuestro Estas son teorías macroscópicas, que por casualidad ya conocíamos antes de Entendían que

eran el doble de una teoría microscópica sin gravedad. No podemos resistir Haciendo la analogía con una situación en la que habríamos desarrollado una teoría para Elasticidad utilizando tensores de tensión en un medio continuo medio siglo antes de conocer Sobre los átomos. Probablemente habríamos sido igualmente resistentes al aceptar lo obvio. La gravedad y las cuerdas cerradas no son muy diferentes, pero aún no nos hemos acostumbrado A la idea. Los datos de grano grueso viven en pantallas más pequeñas obtenidas moviendo la primera pantalla Más hacia el interior del espacio. La información que se elimina mediante Graining se sustituye por la parte emergida del espacio entre las dos pantallas. De este modo Se obtiene una descripción anidada o foliada del espacio al tener superficies contenidas dentro Superficies. En otras palabras, al igual que en AdS / CFT, hay una dirección emergente en Espacio que corresponde a una variable de "grano grueso", algo así como la escala de corte Del sistema en las pantallas. A priori no hay dirección holográfica preferida en un espacio plano. Sin embargo, esto es Donde utilizamos nuestra observación sobre el potencial de Newton. Es la variable natural Que mide la cantidad de grano grueso en las pantallas. Por lo tanto, el holográfico Dirección es dada por el gradiente $V\Phi$ del potencial de Newton. En otras palabras, el Las pantallas holográficas corresponden a las superficies equipotenciales. Esto conduce a una 12

Página 13

Figura 4: Las pantallas holográficas se encuentran en las superficies equipotenciales. La información sobre Las pantallas tienen grano grueso en la dirección de valores decrecientes del potencial Newton Φ . El granulado grueso máximo ocurre en horizontes de agujero negro, cuando $\Phi / 2c^2 = -1$. Foliación del espacio, excepto que las pantallas pueden romperse en partes desconectadas que Rodean diferentes regiones del espacio. Esto se representa en la figura 4. La cantidad de granulado grueso se mide por la relación $-\Phi / 2c^2$, como puede verse a partir de (3.16). Tenga en cuenta que se trata de un número adimensional que está siempre entre cero y uno. Sólo es igual a uno en el horizonte de un agujero negro. Interpretamos esto como el Punto en el que todos los bits han sido de granularidad máxima. Así, la foliación naturalmente Se detiene en los horizontes del agujero negro. 4.1 La ecuación de Poisson para las distribuciones generales de materia. Considere un estado microscópico, que después de grano grueso corresponde a una masa dada Distribución en el espacio. Todos los estados microscópicos que conducen a la misma distribución de masa Pertenecen al mismo estado macroscópico. La entropía para cada uno de estos estados se define Como el número de estados microscópicos que fluyen al mismo estado macroscópico. Queremos determinar la fuerza gravitatoria mediante el uso de desplazamientos virtuales, y Calculando el cambio asociado en la energía. Así que, vamos a congelar el tiempo y mantener todos los Materia en lugares fijos. Por lo tanto, se describe por una densidad de materia estática $\rho(r)$. Nuestra Objetivo es obtener la fuerza que la distribución de la materia ejerce sobre una colección de partículas con masas m_i y r_i posiciones. Elegimos una pantalla holográfica S correspondiente a una superficie equipotencial con fijo Newton potencial Φ_0 .

Suponemos que toda la distribución de masa dada por $\rho(x)$ es contenida dentro del volumen encerrado por la pantalla, y todas las partículas de prueba están fuera de este volumen. Para explicar la fuerza sobre las partículas, necesitamos de nuevo determinar el trabajo que se lleva a cabo por la fuerza y mostrar que está escrito de forma natural como el cambio en la entropía multiplicado por la temperatura. La diferencia con el caso es esféricamente simétrica que la temperatura en la pantalla no es necesariamente constante. De hecho, la situación 13

Página 14

es, en general, no en equilibrio. Sin embargo, uno puede definir localmente la temperatura y la entropía por unidad de área. En primer lugar vamos a identificar la temperatura. Hacemos esto mediante la adopción de una partícula de prueba y moverlo cerca de la pantalla, y la medición de la aceleración local. Por lo tanto, motivado por nuestra discusión anterior definimos la temperatura análoga a (3.8), es decir, $k_B T = \frac{1}{2\pi} \hbar V \Phi K_c$. (4.17) Aquí, el derivado se toma en la dirección de la que apunta hacia el exterior normal a la pantalla. Nota en este punto Φ se acaba de presentar como un dispositivo para describir la aceleración local de ración, pero no sabemos todavía si satisface una ecuación que relaciona a la distribución masiva. El siguiente ingrediente es la densidad de bits en la pantalla. Suponemos que de nuevo estos bits se distribuyen uniformemente, y así (3.10) se generaliza a $dN = c \int \rho \, dA$. (4.18) Ahora vamos a imponer el análogo de la relación de equipartición (3.11). Se toma la forma de una expresión integral para la energía $E = \frac{1}{2} k_B \int \rho \, dN$. (4.19) Es un ejercicio divertido para trabajar a cabo la consecuencia de esta relación. Por supuesto, la energía E se expresa de nuevo en términos de la masa total de cerrado M . Después de insertar nuestras identificaciones para el lado izquierdo se obtiene una relación familiar: la ley de Gauss! $M = \frac{1}{4\pi G} \int \rho \, dA$. (4.20) Esto debe mantener para pantallas arbitrarias dadas por las superficies equipotenciales. Cuando un bit de se añade masa a la región encerrada por la pantalla de S , por ejemplo, por primera ponerlo cerca de la pantalla y luego empujándolo a través de, la masa M se debe cambiar en consecuencia. Esta condición sólo puede contener, en general, si el potencial Φ satisface la ecuación de Poisson $\nabla^2 \Phi(r) = 4\pi G \rho(r)$. (4.21) Llegamos a la conclusión de que al hacer identificaciones naturales para la temperatura y la densidad de la formación en las pantallas holográficas, que las leyes de la gravedad salen en una de manera sencilla. 14

Página 15

$m_1 \delta r_1, m_2 \delta r_2, m_3 \delta r_3, \dots, \Phi = 0$ Figura 5: Una distribución de la masa en general dentro de la parte aún no surgido del espacio encerrado por la pantalla. Una colección de partículas de prueba con masas m_i se encuentran en puntos arbitrarios r_i en Ya surgió el espacio fuera de la pantalla. Las fuerzas F_i debido a la gravedad se determinan por el trabajo virtual realizado después del desplazamiento infinitesimal δr_i de las partículas. 4.2 La fuerza de la gravedad para las localizaciones de partículas arbitrarias. La

siguiente cuestión es obtener la fuerza que actúa sobre las partículas de materia que se encuentran en puntos arbitrarios fuera de la pantalla. Para ello necesitamos una generalización de la primera posesión Tulate (3.6) a esta situación. ¿Cuál es la variación de entropía debido a la infinitesimal arbitrariadesplazamientos δr_i de las partículas? Sólo hay una opción natural aquí. Queremos encontrar las ΔS de cambio en la densidad de la entropía de forma local en la pantalla S . Hemos observado en (3.16) que el potencial Φ Newton realiza un seguimiento de los cambios de información por unidad de bits. Por lo tanto, la identificación correcta para el cambio de la densidad de la entropía es $\Delta S = k_B \delta \Phi / 2c^2 dN$ (4.22) donde $\delta \Phi$ es la respuesta del potencial Newton debido a los cambios δr_i de las posiciones de las partículas. Para ser específicos, $\delta \Phi$ se determina mediante la solución de la variación de la Poisson ecuación $\nabla^2 \delta \Phi(r) = 4\pi G \sum_i y_i m_i \delta r_i \cdot \nabla (r - r_i)$ (4.23) Se puede comprobar que con esta identificación se reproduce de hecho el cambio de entropía (3.6) cuando una de las partículas se aproxima a la pantalla. Vamos ahora a determinar las fuerzas entrópicas sobre las partículas. El trabajo conjunto realizado por todas las fuerzas que actúan sobre las partículas de prueba se determina por la primera ley de thermody- Nómicas. Sin embargo, tenemos que expresar en términos de la temperatura local y la entropía

Página 16

variación. Por lo tanto, $\sum_i y_i F_i \cdot \delta r_i = \int_S \Delta S / T$ (4.24) Para ver que este hecho da la fuerza de la gravedad en el caso más general, uno simplemente tiene que usar la analogía electrostática. Es decir, uno puede redistribuir toda la masa M como una densidad de superficie de masa sobre la pantalla S sin cambiar las fuerzas sobre las partículas. La variación del potencial de Newton se puede obtener de la función de los verdes para el Laplaciano. El resto de la demostración es una aplicación directa de la electrostática, pero luego se aplica a la gravedad. La identidad básica que uno tiene que demostrar es $\sum_i y_i F_i \cdot \delta r_i = 1/4\pi G \int_S (\Delta \Phi \delta \Phi - \Phi \nabla^2 \delta \Phi) dA$ (4.25) lo que es válido para cualquier lugar de la pantalla fuera de la distribución de masas. Esto es fácilmente verificado mediante el teorema de Stokes y la ecuación de Laplace. El segundo término desaparece cuando la pantalla se elige en una superficie equipotencial. Para ver esto, sólo tiene que sustituir por $\Phi = \Phi_0$ y tire de ella hacia fuera de la integral. Desde $\delta \Phi$ se obtiene solamente por las partículas fuera de la pantalla, el restante integrante apenas da cero. Las fuerzas que obtuvimos son independientes de la elección de la ubicación de la pantalla. Que podría haber elegido cualquier superficie equipotencial, y obtendríamos los mismos valores para F_i , las descritas por las leyes de Newton. Que todo esto funciona no es sólo una cuestión de análisis dimensional. La invariancia bajo la elección de equipotencial superficie es muy coherente con la idea de que un lugar en particular corresponde a una elección arbitraria de la escala que controla el granulado grueso de los datos microscópicos. La física macroscópica, en particular, las fuerzas, debe ser independiente de la elección.

5 El principio de equivalencia y de las ecuaciones de Einstein. Desde que hicimos uso de la velocidad de la luz c en nuestros argumentos, es un paso

lógico para tratar y generalizar nuestra discusión a una situación relativista. Así que supongamos que la teoría microscópica sabe acerca de la simetría de Lorentz, o incluso tiene el grupo de Poincaré como la simetría global. Esto significa que tenemos que combinar el tiempo y el espacio en una geometría. Un escenario con el emergente espacio-tiempo conduce naturalmente a general de coordinar invariante ANCE y curvas geometrías, ya que, a priori, no hay opciones preferidas de coordenadas, ni una razón por curvaturas no estaría presente. En concreto, nos gustaría ver la forma en la relatividad general de Einstein emerge de razonamientos similares a los de la anterior sección. de hecho, vamos a demostrar que esto es posible. Pero primero se estudia el origen de la inercia y el principio de equivalencia. dieciséis

Página 17

5.1 La ley de la inercia y el principio de equivalencia. Considere la posibilidad de un fondo estático con un tiempo global como vector de Killing ξ una . Ver elaparición de inercia y el principio de equivalencia, uno tiene que relacionar la elección de este Matar campo vectorial con la temperatura y los gradientes de entropía. En particular, se gustaría ver que el movimiento geodésico habitual de partículas puede ser entendida como la resultado de una fuerza entrópica. En la relatividad general 5 la generalización natural del potencial de Newton es [11] , $\phi = \frac{1}{2} \log (-\xi \text{ un } \xi \text{ una })$. (5.26) Su exponente e^ϕ representa el factor de corrimiento al rojo que se refiere a coordinar la hora local paraque en un punto de referencia con $\phi = 0$, lo que vamos a tomar para estar en el infinito. Al igual que en el caso no relativista, nos gusta usar ϕ para definir una foliación del espacio, y poner nuestras pantallas holográficas en las superficies de desplazamiento hacia el rojo constante. Este es un producto natural elección, ya que en este caso usa toda la pantalla de coordenadas al mismo tiempo. Entonces el procesamiento de los datos microscópicos en la pantalla se puede hacer usando señales que viajan sin retardo de tiempo. Queremos demostrar que el desplazamiento hacia el rojo perpendicular a la pantalla se puede entender microscópicamente como procedentes de los gradientes de entropía 6 . Para que esto sea explícita, y mucho Consideremos la fuerza que actúa sobre una partícula de masa m . En un entorno de la relatividad general fuerza es menos claramente definido, ya que se puede transformar de distancia por un general de coordenadas transformación. Sin embargo, usando el vector de muerte en tiempo como uno puede dado un invariante lo que significa que el concepto de fuerza [11] . Los cuatro velocidad u una de la partícula y su aceleración $a^b \equiv u^a \nabla_a u^b$ se puede expresaren términos de la matanza del vector ξ^b como $u^a \nabla_a \xi^b = e^{\varphi} \xi^b$, $u^a \nabla_a u^b = e^{-2\phi} \xi^a \nabla_a \xi^b$. Podemos reescribir aún más la última ecuación, haciendo uso de la ecuación de Killing $\nabla_a \xi^a + \nabla^a \xi_a = 0$ y la definición de ϕ . Uno encuentra que la aceleración de nuevo puede expresarse simplemente el gradiente $u^a \nabla_a u^b = -\nabla^b \phi$. (5.27) Tenga en cuenta que al igual que en la situación no relativista la aceleración es perpendicular para detectar S . Así que podemos convertirlo en una cantidad escalar mediante la contratación con una unidad apuntando hacia afuera del vector N^b normal a la pantalla de S y ξ^b . 5 En este apartado y en el siguiente, esencialmente seguimos el libro de Wald sobre la relatividad general

(pág. 288- 290). Utilizamos una anotación en la que C y K_B se ponen igual a uno, pero vamos a seguir G y H explícita.⁶ En toda esta sección será muy útil para mantener el ejemplo de polímero de la sección 2 en mente, ya que hará que la lógica de nuestro razonamiento muy claro. ¹⁷

Página 18

La temperatura T locales en la pantalla está ahora en analogía con el no relativista situación definida por $T = \hbar \omega / k_B$ (5,28) Aquí insertamos un factor de corrimiento al rojo $e^{-\phi}$, ya que la temperatura T se mide con respecto al punto de referencia en el infinito. Para encontrar la fuerza sobre una partícula que se encuentra muy cerca de la pantalla, el primero en utilizar de nuevo el mismo postulado que en la sección dos. Es decir, se supone que el cambio de entropía en la pantalla se $2p$ para un desplazamiento por una longitud de onda Compton normal a la pantalla. Por lo tanto, $\nabla_{\phi} S = -2p \hbar \omega / k_B$ (5,29) donde el signo menos proviene del hecho de que la entropía aumenta cuando cruzamos desde el exterior hacia el interior. Los comentarios hechos sobre la validez de este postulado en el apartado 3.3 se aplican aquí también. La fuerza entrópica ahora sigue de (5,28) $F_{un} = T \nabla_{\phi} S = -2p \hbar \omega$ (5,30) Este es de hecho la fuerza gravitacional correcta que se requiere para mantener una partícula en fijo posición cerca de la pantalla, como se mide desde el punto de referencia en el infinito. Es el análogo relativista de la ley de la inercia $F = ma$ de Newton. El factor adicional $e^{-\phi}$ es debido al desplazamiento hacia el rojo. Tenga en cuenta que \hbar se ha salido de nuevo. Es instructivo volver a escribir la ecuación de fuerza (5,30) en una forma microcanónica. Dejar $S(E, x)$ sea la entropía total asociado a un sistema con energía total E que contiene una partícula de masa m en la posición x . Aquí E también incluye la energía de la partícula. La entropía en general también depende de muchos otros parámetros, pero suprimimos estos en esta discusión. Como explicamos en la sección 2, una fuerza entrópica se puede determinar micro canónicamente añadiendo manualmente un término de fuerza externa, e imponer que la entropía es extremal. Para esta situación se parece a esta condición $\frac{d}{dx} S(E + E_{\phi}(x), m, x) = 0$. (5,31) Se verifica fácilmente que esto conduce a la misma ecuación (5.30). Esto soluciona el equilibrio punto en el que la fuerza externa, parametrizada por $\phi(x)$ y la fuerza entrópica estadísticamente equilibran entre sí. Una vez más hacemos hincapié en el punto de que no hay una fuerza que actúa microscópica ¡aquí! La analogía con la ecuación (2.4) para el polímero, se discutió en la sección 2, en caso de ser obvio ahora. La ecuación (5.31) nos dice que la entropía permanece constante si movemos la partícula al mismo tiempo reducir su energía por el factor de desplazamiento hacia el rojo. Esto es cierto sólo cuando la partícula es muy ligero, y no perturbe las otras distribuciones de energía. simplemente ¹⁸

Página 19

sirve como una sonda de la geometría emergente. Esto también significa que la función de desplazamiento hacia el rojo $\phi(x)$ está completamente fijado por

la otra materia en el sistema. Hemos llegado a la ecuación (5.31), haciendo uso de las identificaciones de las variaciones de temperatura y la entropía en el espacio tiempo. Pero en realidad deberíamos haber ido de la otra manera. Deberíamos haber comenzado a partir de los Microscopics y definir el espacio conceptos dependientes en función de ellos. Elegimos no seguir esta presentación, ya que podría haber aparecido un tanto artificial. Sin embargo, es importante darse cuenta de que el desplazamiento hacia el rojo debe ser visto como una consecuencia del gradiente de la entropía y no al revés. El principio de equivalencia nos dice que los desplazamientos al rojo pueden ser interpretados en el espacio-tiempo como emergente, ya sea debido a un campo gravitacional o debido al hecho de que se considera un marco acelerado. Ambos puntos de vista son equivalentes en el entorno relativista, pero tampoco es vista microscópica. La aceleración y la gravedad son dos fenómenos emergentes.

5.2 Derivación de las ecuaciones de Einstein.

Ahora nos gustaría extender nuestra derivación de las leyes de la gravedad al caso relativista, y obtener las ecuaciones de Einstein. De hecho, esto se puede hacer de natural y muy análoga forma. Así que esta vez consideremos una pantalla holográfica en la superficie cerrada de corrimiento al rojo constante ϕ . Suponemos que se encerraba una configuración determinada masa estática con la masa total M . La densidad de bits en la pantalla es de nuevo dado por $dN = dA \, gh$ (5.32) como en (4.18). Siguiendo la misma lógica que antes, vamos a suponer que la energía asociada con la masa M se distribuye en todos los bits. Una vez más por cada bit de equipartición lleva una unidad de masa igual a $1/2 T$. Por lo tanto $M = 1/2 \int S \, T \, dN$ (5.33). Después de insertar las identificaciones para T y dN obtenemos $M = 1/4 \pi G \int S \, e^{\varphi} \cdot dA$ (5.34). Tenga en cuenta que una vez más se retira h , como se esperaba. La ecuación (5.34) es, en efecto, conocida la generalización natural de la ley de Gauss para la relatividad general. A saber, el derecho lado es precisamente la definición de la masa contenida dentro de una arbitraria de Komar volumen dentro de cualquier espacio-tiempo curvado estática. Puede ser derivado al asumir el Einstein ecuaciones. En nuestro razonamiento, sin embargo, estamos llegando desde el otro lado. Nosotros hicimos identificaciones para la temperatura y el número de bits en la pantalla. Pero no lo hacemos

Página 20

sabe todavía si cumple alguna ecuaciones de campo. La cuestión clave en este punto es si la ecuación (5.34) es suficiente para derivar las ecuaciones completas Einstein. Una cuestión análoga se abordó por Jacobson para el caso de pantallas nulos. Por adaptar su razonamiento a esta situación, y combinándola con la exposición del de Wald la masa Komar, es sencillo de construir un argumento que conduce de forma natural a las ecuaciones de Einstein. Vamos a presentar un esbozo de esto. En primer lugar se hace uso del hecho de que la masa Komar se puede volver a expresarse en términos de el vector de muerte ξ^a como $M = 1/8 \pi G \int S \, dx^a \, \xi_a$ (5.35). El lado izquierdo se puede expresar como una integral sobre el volumen encerrado de determinadas componentes del tensor de energía T_{ab} . Por el lado de una mano derecha primero utiliza Stokesteorema y, posteriormente, la

relación $\nabla_a \nabla_b \xi^a = -R^a_b \xi^a$ (5,36) lo que está implícito en la ecuación de Killing ξ^a . Esto conduce a la relación integral $\int_V \nabla_a \nabla_b \xi^a \xi^b dV = \int_V R^a_b \xi^a \xi^b dV$ (5,37) donde V es el volumen tridimensional delimitado por la pantalla holográfica y S es su normal. La combinación particular de la tensor de energía de la izquierda, presumiblemente, se puede fijar al comparar las propiedades de ambos lados, como por ejemplo las leyes de conservación de los tensores que se producen en las integrales. Esta ecuación se deriva de un fondo estático en general con un tiempo como matar vector ξ^a . Al exigir que se lleva a cabo para pantallas arbitrarias implicarían que también el integrando en ambos lados son iguales. Esto nos da sólo un cierto componente de la Einstein. De hecho, podemos elegir la superficie Σ de muchas maneras, siempre y cuando su límite está dado por S . Esto significa que podemos variar la normalidad n_a . Pero que todavía deja una contracción con el vector de Killing ξ^a . Para llegar a la plena Einstein que ahora utilizan un razonamiento similar como Jacobson [7], excepto que ahora aplicado a las pantallas en tiempo similares. Consideremos una región muy pequeña del espacio-tiempo y esperamos también en escalas de tiempo muy cortos. Desde localmente cada geometría se ve aproximadamente como el espacio de Minkowski, podemos elegir la hora aproximada como vectores de Killing. Consideremos ahora una pequeña parte local de la pantalla, e imponer que cuando la materia lo cruza, el valor de la integral Komar saltará precisamente por la correspondiente masa m . Siguiendo la a continuación, los pasos descritos anteriormente conduce a (5.37) para todos estos vectores de Killing, y por arbitraria Pantallas Esto es suficiente para obtener las ecuaciones completos Einstein. 20

Página 21

5.3 La fuerza sobre un conjunto de partículas en ubicaciones arbitrarias. Cerramos esta sección con la explicación de la forma en que actúa la fuerza entrópica en una colección de partículas en ubicaciones arbitrarias x^i lejos de la pantalla y la distribución masiva. La definición Komar de la masa será de nuevo útil para este propósito. La definición de la masa Komar depende de la elección del vector de Killing ξ^a . En particular, también en su norma, el factor de desplazamiento al rojo e^Φ . Si uno se mueve las partículas por un desplazamiento virtual δx^i , esto afectará a la definición de la masa Komar de la configuración de la materia dentro de la pantalla. De hecho, la temperatura en la pantalla se ve afectada directamente por un cambio en el factor de desplazamiento hacia el rojo. Los desplazamientos virtuales se pueden realizar cuasi estática, lo que significa que el propio vector de muerte aún está presente. Su norma, o el factor de desplazamiento hacia el rojo, pueden cambiar, sin embargo. De hecho, también la métrica espacial puede verse afectada por este desplazamiento. Estamos No va a tratar de resolver estas dependencias, ya que sería imposible debido a la no linealidad de las ecuaciones de Einstein. Pero podemos simplemente usar el hecho de que el Komar masa va a ser una función de la posición x^i de las partículas. Siguiendo supongamos que además de esta x^i dependencia de la masa Komar que la entropía de todo el sistema tiene también explícita x^i dependencias,

simplemente debido a cambios en la cantidad de información. Estos son de diferencia que conducirá a la entrópica fuerza que se desea determinar. Ahora vamos a dar una receta natural para la entropía dependencia que se basa en un principio de máxima entropía y de hecho da el derecho efectivo. Es decir, se supone que la entropía se puede escribir como una función de la Komar masa M y, además, en la x_i . Pero dado que la masa debe ser considerada Komar como una función $M(x_i)$ de las posiciones x_i , habrá una explícita y una implícita x_i la dependencia de la entropía. El principio de máxima entropía implica que estas dos dependencias deben cancelar. Así imponemos $S(M(x_i) + \delta x_i) = S(M(x_i), x_i)$ (5,38) Mediante la elaboración de esta condición y señalar a las ecuaciones implícitas en cada variación δx_i se encuentra $\nabla_i M + T \nabla_i S = 0$ (5,39) El punto es que el primer término representa la fuerza que actúa sobre la partícula i -ésima debido a la distribución de la masa dentro de la pantalla. Esta fuerza es de hecho igual a menos la derivado de la masa Komar, simplemente debido a la conservación de energía. Pero de nuevo, esta no es la razón microscópica para la fuerza. En analogía con el polímero, el Komar masa representa la energía del baño de calor. Su dependencia de la posición de la otras partículas es causado por desplazamientos al rojo cuyo origen microscópico se encuentra en el agotamiento de la energía en el baño de calor debido a los efectos entrópicos. Dado que la integral Komar se define en la pantalla holográfica, está claro que, al igual en el caso no relativista la fuerza se expresa como una integral sobre esta pantalla también. No hemos tratado de hacer esta representación más concreta. Por último, observamos que 21

Página 22

este argumento es muy general, y realmente no hizo uso de la forma precisa de la Komar ecuaciones integrales, o el Einstein. Por lo tanto, debe ser sencillo generalizar este razonamiento para teorías de la gravedad de derivados más altos, haciendo uso de la carga de Noether Wald formalismo [12], que es perfectamente adecuado para este propósito.

6 Conclusión y Discusión

Las ideas y los resultados presentados en este documento de plomo a muchas preguntas. En esta sección discutimos y tratamos de responder a algunas de ellas. En primer lugar presentamos nuestra conclusión principal.

6.1 El fin de la gravedad como una fuerza fundamental.

La gravedad ha dado muchos indicios de ser un fenómeno emergente, sin embargo, hasta el día de hoy todavía es visto como una fuerza fundamental. Las similitudes con otro emergente conocida fenómenos, tales como la termodinámica y la hidrodinámica, se han considerado en su mayoría analogías como se acaba de sugerentes. Es hora de que no sólo notamos la analogía, y hablamos de la similitud, pero finalmente acabar con la gravedad como una fuerza fundamental. Por supuesto, la descripción geométrica de Einstein de la gravedad es hermosa, y en cierto manera convincente. Geometría apela a la parte visual de nuestra mente, y es increíblemente de gran alcance en el resumen de muchos aspectos de un problema físico. Es de suponer que esto explica Por eso nosotros, como comunidad, hemos sido tan reacios a renunciar a la formulación geométrica de la gravedad como fundamentales. Pero es inevitable lo hacemos. Si la

gravedad es emergente, por lo que es espacio geometría tiempo. Einstein atada estos dos conceptos juntos, y ambos tienen que renunciar si queremos comprender uno o el otro a un nivel más fundamental. Los resultados de este trabajo sugieren la gravedad surge como una fuerza entrópica, una vez que el espacio y el Tiempo mismos han surgido. Si el tiempo de la gravedad y el espacio de hecho puede explicarse como fenómenos emergentes, esto debería tener implicaciones importantes para muchas áreas de el que la gravedad juega un papel central. Sería especialmente interesante investigar las consecuencias para la cosmología. Por ejemplo, la forma en que surgen los desplazamientos al rojo de la entropía gradientes podrían dar lugar a muchas nuevas ideas. La derivación de las ecuaciones de Einstein presentados en este documento es análogo a trabajos anteriores, en particular, [7]. También se han propuesto otros autores que la gravedad tiene un origen entrópico o termodinámico, véase por ejemplo [14]. Sin embargo, hemos añadido un elemento importante que es nuevo. En lugar de solamente centrándose en las ecuaciones que gobiernan el campo gravitatorio, hemos descubierto cuál es el origen de la fuerza y la inercia en un contexto en el que está emergiendo espacio. Hemos identificado una causa, un mecanismo, por gravedad. Es impulsado por las diferencias de entropía, en cualquier forma definida, y una consecuencia de la estadística promediado dinámica al azar a nivel microscópico. La razón por la gravedad tiene que realizar un seguimiento de las energías así como las diferencias de entropía es ahora clara. Tiene que, debido esto es lo que provoca el movimiento! Los argumentos presentados han sido ciertamente muy heurístico. Uno no puede esperar 22

Página 23

de lo contrario, dado el hecho de que estamos entrando en un territorio desconocido en el que el espacio hace no existe, para empezar. La naturaleza profunda de estas cuestiones en nuestra opinión, justifica el nivel de razonamiento heurístico. Los supuestos que hemos hecho han sido natural: encajan con las ideas existentes y son apoyados por varios elementos de prueba. En el siguiente recogemos más evidencia que apoya la teoría de cuerdas, la correspondencia AdS / CFT, y la física de los agujeros negro. 6.2 Implicaciones para la teoría de cuerdas y la relación con los anuncios / CFT. Si la gravedad es una fuerza entrópica, entonces, ¿qué dice esto acerca de la teoría de cuerdas? Gravedad es visto como una parte integral de la teoría de cuerdas, que no se puede retirar justo así. Pero sí sabemos acerca de la dualidad entre las teorías de cuerdas cerradas que contienen la gravedad y desacoplado teorías de cuerdas abiertas que no lo hacen. Un ejemplo particularmente importante es la correspondencia AdS / CFT. El / la cadena y los anuncios cerrada abierta / CFT correspondencias son manifestaciones de la UV / IR de conexión que está arraigado profundamente dentro de la teoría de cuerdas. Esta conexión implica que la física corta y larga distancia no puede ser visto como totalmente desacoplado. La gravedad es un fenómeno de larga distancia que se conoce con claridad la física distancia corta sobre, ya que es evidente que la constante de Newton es una medida para el número de microscópico grados de libertad. La teoría de cuerdas invalida la "sabiduría en

general" que se basa en la teoría de campo eficaz de Wilson, a saber, que la integración a corto grados de corta distancia de la libertad sólo generan términos locales en la adopción de medidas eficaces, la mayoría se quedan irrelevantes a bajas energías. Si eso fuera del todo cierto, la física macroscópica haría ser insensible a la física de corta distancia. La razón por la cual el argumento de Wilson falla, es que hace un muy conservador hipótesis sobre el crecimiento asintótico del número de estados a altas energías. En la teoría de cuerdas el número de estados de cuerdas abiertas de alta energía es tal que su integración de hecho, lleva a cabo efectos de largo alcance. Sus amplitudes uno de bucle son equivalentes a la contribuciones a nivel de árbol debido al cambio de cierre estados de cuerdas, que entre otras son responsables de la gravedad. Esta interacción es, sin embargo, de manera equivalente representado por la suma sobre todas las contribuciones cuánticas de la cuerda al aire. En este sentido el emergente naturaleza de la gravedad también es apoyado por la teoría de cuerdas. La correspondencia AdS / CFT tiene un número creciente de aplicaciones para las áreas de la física en la que la gravedad no está presente en un nivel fundamental. técnicas gravitacionales se utilizan como herramientas para calcular las magnitudes físicas en un régimen en el que la microscópica Descripción falla. El último de estos desarrollos es la aplicación de condensado teoría de la materia. Nadie duda de que en estas situaciones la gravedad surge sólo como una Descripción eficaz. No surge en el mismo espacio que la teoría microscópica, pero en un escenario holográfico con una dimensión extra. No existe una explicación clara de hacia dónde esta fuerza gravitatoria viene. El mecanismo entrópico se describe en este documento deben ser aplicables a estos sistemas físicos, y explicar la aparición de la gravedad. 23

Página 24

Abierto IR Cerrado IR un) segundo) Figura 6: La teoría microscópica en a) se describe de manera efectiva por una teoría de la secuencia que consiste de cadenas abiertas y cerradas, como se muestra en b). Ambos tipos de cuerdas se cortan en el UV. El escenario holográfico analizado en este documento ha ciertamente ser inspirado por el holografía manera funciona en los anuncios / CFT y abrir las correspondencias cuerda cerrada. en cadena idioma, las pantallas holográficas pueden identificarse con D-branas, y la microscópica grados de libertad en estas pantallas representados como cadenas abiertas definidas con un punto de corte en el UV. La parte emergida de espacio está ocupado por cuerdas cerradas, que son también definida con un UV cortada, como se muestra en la figura 6. Los offs cadena de corte abiertos y cerrados están relacionados por la correspondencia UV / IR: empujando la cuerda al aire cortada a la UV fuerza la cuerda cerrada cortado hacia el IR, y viceversa. El valor de los puntos de corte se determina por la ubicación de la pantalla. La integración de las cuerdas al aire produce las cuerdas cerradas, y conduce a la aparición de espacio y la gravedad. Tenga en cuenta, sin embargo, que desde nuestro punto de vista, no se asume la existencia de la gravedad o cerrados cuerdas microscópicamente: que son emergentes como una descripción efectiva. De esta forma, la correspondencia de cadena abierta / cerrada apoya

la interpretación de la gravedad como una fuerza entrópica. Sin embargo, muchos todavía ven el lado cuerda cerrada de estas dualidades es una teoría fundamental bien definida. Sin embargo, en nuestra opinión, la gravedad y cuerdas cerradas son emergente y sólo está presente como concepto macroscópico. Simplemente sucedió que ya sabía de la gravedad antes de que el resultado podría obtenerse de un microscopio. La teoría sin ella. No podemos resistir a hacer la analogía con una situación en la que nos habría desarrollado una teoría de la elasticidad mediante tensores de tensión en un medio continuo medio siglo antes de saber acerca de los átomos. Que probablemente habría sido igualmente resistente al aceptar lo obvio. La gravedad y cuerdas cerradas no son muy diferentes, pero sólo tenemos que acostumbrar a la idea. 24

Página 25

6.3 horizontes agujero negro revisited Hemos salvado tal vez el argumento más claro por el hecho de que la gravedad es una fuerza entrópica hasta el último momento. Las primeras grietas en la naturaleza fundamental de la gravedad aparecieron cuando Bekenstein, Hawking y otros descubrieron las leyes de la termodinámica de agujeros negros. En De hecho, el experimento mencionado en el apartado 3 que condujo a su entropía de Bekenstein la ley es sorprendentemente similar al problema de polímero. El agujero negro sirve como el calor baño, mientras que la partícula puede ser pensado como el punto final del polímero que es permitido gradualmente a volver a su situación de equilibrio. Por supuesto, no hay polímero en el sistema de la gravedad, y no parece haber ninguna el contacto directo entre la partícula y el agujero negro. Pero aquí estamos ignorando la hecho de que una de las dimensiones es emergente. En la descripción holográfica de este mismo proceso, la partícula puede ser pensado como la inmersión en el baño de calor que representa el agujero negro. Este hecho es particularmente evidente en el contexto de ADS / CFT, en el que una agujero negro es dual a un estado térmico en el límite, mientras que la partícula está representado como operador deslocalizada que poco a poco se está thermalized. En el momento en que la partícula alcanza el horizonte se ha convertido en parte del estado térmico, al igual que el polímero. Este fenómeno es claramente entrópica en la naturaleza, y es la consecuencia de una estadístico del proceso que impulsa el sistema a su estado de máxima entropía. Tras una inspección más de cerca el razonamiento de Bekenstein se puede utilizar para mostrar que la gravedad se convierte en una fuerza entrópica cerca del horizonte, y que las ecuaciones presentadas en el apartado 3 son exactamente válida. Él argumentó que uno tiene que elegir una ubicación un poco lejos de la horizonte del agujero negro a una distancia de aproximadamente del orden de la longitud de onda de Compton, donde declaramos que la partícula y el agujero negro se han convertido en un solo sistema. Déjanos decir esta ubicación se corresponde con la elección de una pantalla holográfica. La ubicación precisa de esta pantalla no puede ser importante, sin embargo, ya que no hay una distancia preferida naturales que uno puede elegir. Las ecuaciones, por tanto, no deberían depender de las pequeñas variaciones de esta distancia. Tirando de la partícula un poco más lejos, uno cambia su energía por una cantidad pequeña igual al trabajo

realizado por la fuerza gravitatoria. Si uno cae entonces en la partícula al agujero negro, la masa M se incrementa en la misma cantidad adicional. Consistencia de las leyes de la termodinámica de agujeros negros implica que el cambio adicional en el Bekenstein Hawking entropía, cuando se multiplica con la temperatura T_{Hawking} , debiese precisamente igual al trabajo realizado por la gravedad. Por lo tanto, $F_{\text{gravedad}} = T_H \partial S_{\text{BH}} / \partial x$. (6,40) La derivada de la entropía se define como la respuesta de S_{BH} debido a un cambio en la distancia x de la partícula hasta el horizonte. Este hecho se conoce con seguridad, y probablemente sólo considerado como una comprobación de coherencia. Pero tomemos que uno o dos pasos más allá. Supongamos que tomamos la pantalla incluso más lejos del horizonte. El mismo argumento se aplica, sino que también podemos optar por ignorar el hecho de que la pantalla se ha movido, y bajar 25

Página 26

la partícula a la ubicación de la pantalla anterior, la más cerca del horizonte. Este proceso que sucedería en la parte del espacio detrás de la nueva ubicación de la pantalla, y por lo tanto debe tener una representación holográfica en la pantalla. En este sistema no es fuerza en la dirección perpendicular no tiene sentido microscópico, ni la aceleración. Las coordenadas x perpendicular a la pantalla es sólo una variable de escala asociado con la imagen holográfica de la partícula. Su interpretación como una de coordenadas es un derivado concepto: esto es lo que significa tener un espacio emergente. La masa se define en términos de la energía asociada con la imagen holográfica de la partícula, que presumiblemente es un estado térmico próximo. Sin embargo, no es exactamente térmica, porque todavía es un poco lejos del horizonte del agujero negro. Hemos tirado fuera de equilibrio, al igual que el polímero. Entonces, uno puede preguntarse: ¿cuál es la causa del cambio en la energía que es holográfica dual para el trabajo realizado cuando en el espacio emergente que bajar gradualmente la partícula hacia la ubicación de la pantalla antigua detrás de la nueva. Por supuesto, esto puede ser otra cosa entonces un efecto entrópico, la fuerza se debe simplemente a el proceso de termalización. Debemos concluir que la única explicación microscópica es que hay una actuación emergente fuerza entrópica. De hecho, las reglas de correspondencia entre la variable de escala y la energía por un lado, y el emergente de coordenadas x la masa m en el otro, debe ser tal que $F = T \nabla S$ traduce en la gravitacional fuerza. Es fácil ver que este hecho funciona y que las ecuaciones para la temperatura y la variación de entropía son exactamente como se describen en el apartado 3. El horizonte es solamente un lugar especial para los observadores que se quedan fuera del agujero negro. El agujero negro puede ser arbitrariamente grande y la fuerza de la gravedad en su horizonte arbitrariamente débil. Por lo tanto, este experimento mental no sólo se nos enseña acerca de agujeros negros. Nos enseña acerca de la naturaleza del espacio-tiempo, y el origen de la gravedad. O, más exactamente, que nos dice sobre la causa de la inercia. Podemos hacer lo mismo pensamiento experimento para un horizonte Rindler, y llegar exactamente a la misma conclusión. En este caso las reglas de correspondencia deben ser tales que $F =$

TVS se traduce en que la fuerza de inercia $F = ma$. Una vez más las fórmulas funcionan como en la sección 3. 6.4 Comentarios finales Esto nos lleva a una forma un tanto sutil y aún no se entiende completamente los aspectos. Es decir, el papel de h . Los argumentos anteriores ponen de manifiesto que cerca del horizonte son las ecuaciones válidas con h identificado con la constante de Planck real. Sin embargo, no tenemos directa confirmación o prueba de que lo mismo es cierto cuando nos alejamos del horizonte, o especialmente cuando no hay horizonte presente en absoluto. De hecho, hay razones para creer que las ecuaciones funcionan ligeramente diferente allí. La primera es que uno no es exactamente en el equilibrio térmico. Horizontes se han temperaturas bien definido, y claramente se encuentran en equilibrio térmico. Si se supone que la pantalla en una superficie equipotencial con $\Phi = 0$ está en equilibrio, la entropía sea necesario para conseguir la temperatura Unruh (3.0.8) está dada

Página 27

por la fórmula de Bekenstein-Hawking, incluyendo el factor de $1/4$, $S = \frac{c^3}{4G\hbar} \int dA$. (6.41) Este valor de esta entropía parece ser muy alto, y viola la cota de Bekenstein [15] que establece que un sistema contenía en la región de radio R y la energía total E no puede tener una entropía mayor que $E R$. La razón de esta discrepancia puede ser que el argumento de Bekenstein no es válida para los grados de libertad holográficas en la pantalla, o por el hecho de que estamos lejos del equilibrio. Pero también puede haber otras formas de reconciliar estas declaraciones, por ejemplo mediante haciendo uso de la libertad de reescalar el valor de h . Esto no afectaría a la final resultado de la fuerza, ni el hecho de que es entrópica. De hecho, incluso se puede multiplicar h por una función $f(\Phi)$ del potencial de Newton en la pantalla. Este cambio de escala afectarían los valores de la entropía y la temperatura en direcciones opuestas: T se multiplica por un factor, mientras que S se divide por el mismo factor. Dado que, a priori, no podemos excluir esta posibilidad, hay algo para ser entendido. De hecho, hay incluso otras modificaciones posibles, como una descripción que se utiliza medio ponderado durante muchas pantallas con diferentes temperaturas. Incluso entonces, la esencia de nuestras conclusiones haría no cambia, que es el hecho de que la gravedad y la inercia son fuerzas entrópicas. ¿Este punto de vista de la gravedad conduce a predicciones? La media estadística debe dar las leyes usuales, por lo tanto, hay que estudiar las fluctuaciones en la fuerza de la gravedad. Su tamaño depende de la temperatura eficaz, que puede no ser universal y depende de el valor efectivo de h . Una idea interesante es que las fluctuaciones pueden llegar a ser más pronunciado para los campos gravitacionales débiles entre los pequeños cuerpos de la materia. Pero Es evidente que necesitamos una mejor comprensión de la teoría de convertir esto en una predicción. Es bien sabido que Newton fue criticada por sus contemporáneos, especialmente por Hooke, que su ley de la gravedad actúa a distancia y no tiene ninguna causa mecánica directa como la fuerza elástica. Irónicamente, esta es precisamente la razón por la fuerza elástica de Hooke es hoy en día no se ve como algo fundamental, mientras que la fuerza gravitacional de Newton ha mantenido que el estado

durante más de tres siglos. Lo que Newton no lo sabía, y desde luego Hooke no lo hizo, es que el universo es holográfico. La holografía es también una hipótesis, de Por supuesto, y puede aparecer tan absurdo como una acción a distancia. Uno de los puntos principales de este documento es que la hipótesis holográfica ofrece un mecanismo natural de la gravedad para emerger. Permite interacciones directas de "contacto" entre los grados de libertad asociados con un cuerpo material y otro, ya que todos cuerpos dentro de un volumen pueden ser mapeados en la misma pantalla holográfica. Una vez que esto se hace, los mecanismos de la gravedad de Newton y la elasticidad de Hooke son sorprendentemente similar. Tenemos la sospecha de que ninguno de estos rivales habría sido feliz con esta conclusión. 27

Página 28

Expresiones de gratitud Este trabajo es apoyado en parte por Stichting FOM. Me gusta dar las gracias a J. de Boer, B. Chowdhuri, R. Dijkgraaf, P. McFadden, G. 't Hooft, B. Nienhuis, J.-P. van der Schaar, y especialmente M. Shigemori, K. Papadodimas, y H. Verlinde para las discusiones y Comentarios. Referencias [1] JD Bekenstein, "Los agujeros negros y la entropía," Phys. Rev. D 7, 2333 (1973). [2] JM Bardeen, B. Carter y SW Hawking, "las cuatro leyes de agujero negro mecánica," Commun. Mates. Phys. 31, 161 (1973). [3] S. W. Hawking, "la creación de partículas por agujeros negros," Commun matemáticas. Phys. 43, 199-220, (1975) [4] PCW Davies, "la producción de partículas escalar en Schwarzschild y Rindler metformina RICS," J. Phys. A 8, 609 (1975) [5] WG Unruh, "Indicaciones para la evaporación de un agujero negro," Phys. Rev. D 14, 870 (1976). [6] T. Damour, "Efectos de superficie en la física agujero negro, en Actas de la Sección En segundo Encuentro Marcel Grossmann en la relatividad general ", Ed. R. Ruffini, Norte Holanda, p. 587, 1982 [7] T. Jacobson, "Termodinámica de espacio-tiempo: La ecuación de Einstein de Estado" Phys. Rev. Lett. 75, 1260 (1995) [8] G. Hooft "t", la reducción de dimensiones en la gravedad cuántica, "arXiv: gr-qc / 9310026. [9] L. Susskind, "El mundo como un holograma," J. Math. Phys. 36, 6377 (1995) [ArXiv: hep-th / 9409089]. [10] JM Maldacena, "El gran límite de N de las teorías de campo y supervisión superconformal la gravedad," Adv. El o. Mates. Phys. 2, 231 (1998) [Int. J. Theor. Phys. 38, 1113 (1999)] [11] RM Wald, "Relatividad General," La Universidad de Chicago Press, 1984 [12] RM Wald, "agujero Negro entropía es la carga de Noether," Phys. Rev. D 48, 3427 (1993) [arXiv: gr-qc / 9307038]. [13] L. Susskind, "El paisaje antrópico de la teoría de cuerdas," arXiv: hep-th / 0302219. 28

Página 29

[14] T. Padmanabhan, "Aspectos termodinámicas de gravedad: Nuevos conocimientos," arXiv: 0911.5004 [gr-qc] y las referencias en él. [15] JD Bekenstein, "Un Alto límite universal de la relación de la entropía a la energía Para acotada Systems," Phys. Rev. D 23 (1981) 287.